

**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Надія Бурау

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проект**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «151 Автоматизація та комп'ютерно  
інтегровані технології»**

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно інтегровані технології та сис-  
тем навігації і керування»

**на тему: «Рульовий привод безпілотного літального апарату»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПГ - 61

Савицький Олександр Андрійович \_\_\_\_\_

Керівник: доцент кафедри ПСОН , к.т.н., доцент

Мироненко Павло Степанович \_\_\_\_\_

Консультант \_\_\_\_\_

Рецензент:

Асистент, к.т.н.,

Івасенко Віталій Михайлович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

## Зміст

Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	10
1.1. Огляд сучасних безпілотних літальних апаратів .....	10
1.2. Огляд і аналіз відомих конструкцій рульових машинок.....	16
1.3. Математична модель рульового приводу .....	22
1.4. Опис та аналіз кулькогвинтового механізму.....	23
1.5. Переваги імпульсного керування електромеханічними приводами постійного струму перед аналоговими .....	26
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА РУЛЬОВОГО ПРИВОДУ З КУЛЬКОГВИНТОВОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ .....	28
2.1 Розробка кінематичної схеми рульової машинки .....	28
2.2 Розрахунки елементів кулькогвинтої передачі .....	30
2.3 Розрахунок коефіцієнта корисної дії рульової машинки .....	36
2.4 Кінематична точність рульової машинки і порядок її визначення.....	40
Висновки .....	42
Список літератури .....	43

## Вступ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) – літальні апарати, що здатні виконувати політ без командира повітряного судна на борту, і керування над якими може здійснюватися з іншого місця на землі, з іншого повітряного судна або бути запрограмованим та автономним.

Багато країн світу в наш час займаються розробкою та виробництвом безпілотних літальних апаратів нового покоління, які можуть бути застосовані для виконання різних завдань у багатьох галузях. БПЛА можуть використовуватися у сільському господарстві, геодезії (картографії), природоохоронних організаціях, екстрених службах, в військових організаціях та в деяких інших сферах діяльності людей.

БПЛА використовують для моніторингу місцевості, фото та відеозйомки, транспортування вантажів та виконання завдань в інтересах Збройних Сил. Варто зазначити, що БПЛА можуть бути дистанційно пілотованими або виконувати політ по заздалегідь створеній програмі, при цьому даючи можливість оператору втрутитися в керування в будь-який момент польоту.

Використання саме БПЛА має ряд переваг у всіх вищезазначених сферах застосування. Утримання та технічне обслуговування БПЛА значно дешевше ніж у пілотованої авіації. Спеціалісти, що керують або обслуговують літаки або гвинтокрили, мають проходити атестацію та лікарняну комісію, що призводить до додаткових витрат часу та фінансів. Також БПЛА не потребують наявності великого майданчику для зльотів та посадок, адже їм достатньо смуги в 500-600 метрів, а для мініатюрних дронів майданчик може бути зовсім малий. Окрім цього БПЛА економно витрачають паливо завдяки своїм габаритам, тому це також зменшує витрати на їх експлуатацію.

Класифікація БПЛА відбувається за такими параметрами:

- маса (мікро – сотні грамів, міні – до 150 кілограмів, середні – до однієї тони та важкі – вище однієї тони);
- тривалість польоту (30-40 хвилин, декілька годин або більше однієї доби)

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		

- висота польоту (БПЛА з максимальною висотою 1 кілометри, 3 кілометри або більше 15 кілометрів)
- призначення (розвідувальні, транспортуючі або бойові).

Саме через таку широку область можливого застосування та значні переваги у використанні, усі дослідження та винаходи в області БПЛА є надзвичайно актуальними на сьогоднішній день.

Відомо, що трудомісткість виготовлення рульового приводу БПЛА з джерелом живлення досягає 40% від трудомісткості виготовлення самих безпілотників. Тому спрощення конструкцій приводів є важливою задачею.

Рульовими машинками називають електромеханічні механізми, що використовуються для приведення в рух органів керування БПЛА (руля висоти, руля напрямку, елеронів, закрилків, гальмівних щитків, тощо).

Метою цього дипломного проекту є розробка рульової машинки для малорозмірних літальних апаратів з підвищеним ККД.

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		9

# РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

## 1.1. Огляд сучасних безпілотних літальних апаратів

Сучасні безпілотні літальні апарати поділяються на два основних види: малорозмірні моделі літаків з фіксованими крилами та безпілотні дрони (мультикоптери).

Дрони – літальні апарати, що керуються оператором за допомогою пульта, або за допомогою бортового комп'ютера та мають кілька пропеллерів, які є засобами набуття висоти та водночас керуючими органами. Сучасні моделі дронів відрізняються великою різноманітністю. Вони можуть відрізнятися кількістю пропелерів (найрозповсюдженішою є конструкція «квадрокоптер» з чотирьма парами лопастей) та за призначенням. За призначенням дрони класифікуються наступним чином:

- комерційні – дрони, які перевозять вантажі, обробляють поля, допомагають в будівництві, в наукових дослідках, в роботі пожежників;
- цивільні – дрони, які використовуються для зйомки місцевості - фотографування та відеозйомки з висоти пташиного польоту;
- військові та бойові – дрони, які розроблені для спеціальних завдань Збройних Сил та мають досить широкий спектр можливого застосування від розвідки та моніторингу місцевості до доставки обладнання між позиціями.

На рис.1 зображена спрощена модель конструкції безпілотного квадрокоптера. Він приводиться в дію за рахунок пропеллерів 3, що обертаються двигунами 1 та закріплені на рамі 5. Кожен двигун має регулятор обертів 2 та спеціальні захистні кільця для збереження лопастей у випадку падіння або фізичного контакту з перешкодами під час польоту. Політний контролер 4 знаходиться посередині та відповідає за керування всіма двигунами. Він риймає сигнали з пульта оператора квадрокоптера та спрямовує їх двигунам.

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		

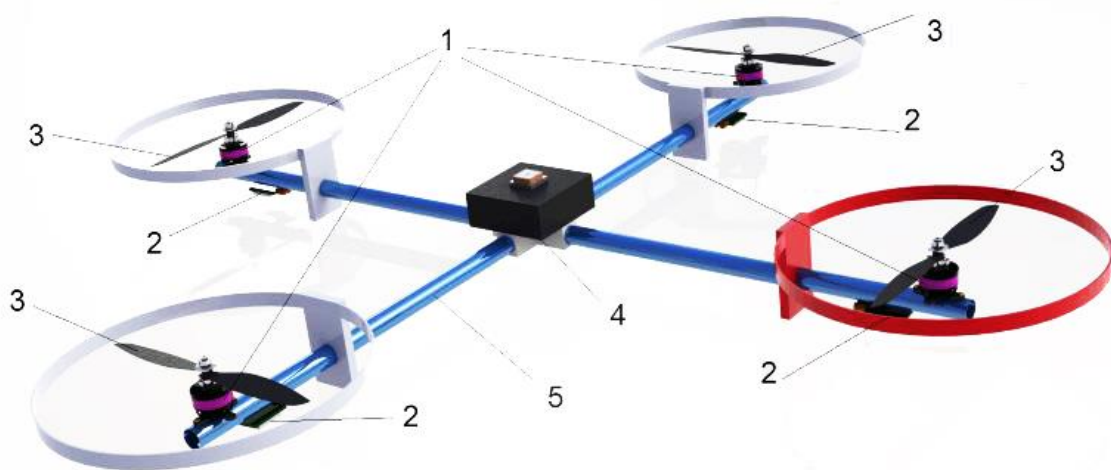


Рис 1. Загальний вигляд основних елементів конструкції квадрокоптера

Зазвичай контролер складається з головного процесора, акселерометра, гіроскопа, барометра та GPS-навігатора. Також більшість контролерів мають Wi-Fi модулі для зв'язку з пультом. Дрони є доволі простими у використанні та не потребують багато часу для того, щоб оператор навчився контролювати політ дрона.

Сучасні дрони представлені в різноманітних розмірах. Існують великі дрони з шістьма та вісьма пропеллерами, що можуть перевозити на собі значні вантажі та мають набагато більше можливостей маневрів під час польоту. Існують надмалі дрони, рами яких здатні складатися в середину разом з лопастями пропеллера. Такі надмалі дрони, приклад яких представлений на рис.2, в складеному положенні здатні розміщуватися в долоні завдяки додатковим ускладненням конструкції рами. Вона включає в себе шарніри, які дозволяють рамкам, на яких закріплені двигуни, складатися вздовж корпусу безпілотної, тому мають широкий спектр можливого застосування для різноманітних зйомок через простоту свого транспортування. Недоліками таких надмалих дронів є ризик пошкодити лопасті у разі зіткнення з твердими об'єктами під час польоту та неможливість безпечно керувати ними в умовах сильного вітру, адже через свою малу масу вони набагато легше втрачають керованість.



Рис. 2. Модель надмалого квадрокоптера, виконана в середовищі SolidWorks

Малорозмірні безпілотні літальні апарати з фіксованими крилами зазвичай застосовуються для виконання більш комплексних завдань, адже особливості їх конструкції дозволяють більш контрольований політ за рахунок органів керування, що забезпечують керованість за тангажем, ристанням та креном, а конструкція фюзеляжу таких БПЛА дозволяє розміщення кращих камер та іншого обладнання, яке було б проблематично розмістити в дроні через габаритні обмеження.

Приклад подібного БПЛА представлений на рис.3. Такі безпілотники схожі за принципом роботи з пілотованими літаками. Конструкція таких безпілотних літальних апаратів може різнитися в залежності від призначення, але в основній масі вони мають звичні органи керування: рулі висоти (дозволяють обертання навколо поперечної горизонтальної осі літального апарату, тобто тангаж), рулі напрямку (дозволяють обертання навколо вертикальної осі літального апарату, тобто ристання) та елерони (дозволяють обертання навколо повздовжної осі літального апарату, тобто крен). В деяких конструкціях елерони можуть бути з'єднані і виконувати функцію руля висоти, якщо завдання безпілотного літального апарату не потребує поворотів з креном корпусу.



Рис.3. Модель БПЛА з фіксованими крилами

Такі БПЛА використовуються для моніторингу місцевості, картографії, військової розвідки, розпилення речовин в сільському господарстві, для упередження лісових пожеж, тощо. Мають ряд переваг перед мультикоптерами, серед них:

- більш чутлива керованість;
- кращі аеродинамічні показники;
- можливість закріплення більш комплексних модулів у корпусі;
- більша дальність польоту;
- можливість включити у конструкцію набагато більше модулів одночасно (інфрачервоні або теплові датчики, камери з високою якістю зображення, GPS-навігатори).

Безпілотні літальні апарати подібної конструкції класу міні отримали широке застосування у військових. Розглянемо та проаналізуємо деякі приклади його конструукцій, що застосовуються в Україні та світі.

На рис. 4. зображений багатоцільовий БПЛА Bayraktar Mini UAV, розроблений турецькою компанією Baykar Machine Inc. Він виготовлений з композитних матеріалів, а його запуск здійснюється з рук. Він призначений для розвідувальних завдання вдень та вночі. Розробка цього БПЛА почалась у 2004-му році, а вже через півтора року почалось серійне виробництво, а через 3 роки конструкція була доопрацьована, отримала назву Bayraktar B та з'явилась на озброєнні у збройних силах Туреччини.



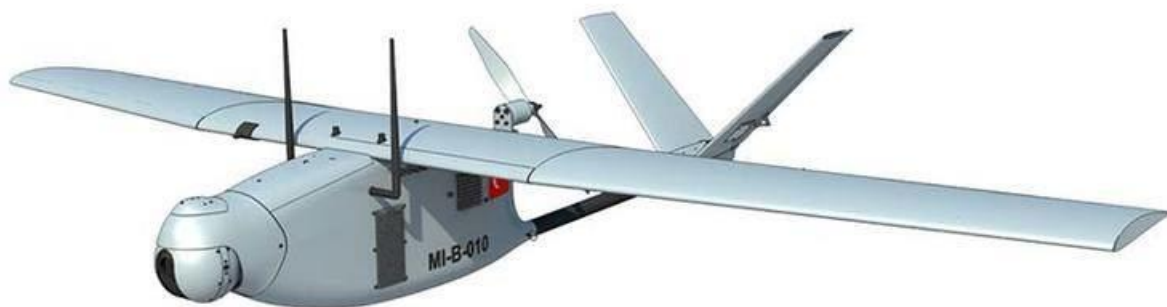


Рис.4. Bayraktar mini UAV

Даний БПЛА важить лише 4,6 кг, довжина його корпусу становить 1,2 м, а розмах крил - 2 м. Крейсерська швидкість такого БПЛА – 60 км/год, тривалість польоту становить близько 60 хвилин, а радіус дії – до 10 км. В Збройних Силах України використовуються модернізовані безпілотники Bayraktar TB2, що є ударно-бойовими - значно збільшеними у розмірах версії цього БПЛА.

На рис. 5. зображений малий розвідувальний безпілотник американського виробництва - RQ-11 Raven. Цей БПЛА розроблений у 2001 році компанією AeroVironment Inc. Такий літальний апарат має GPS-модуль, тому здатний літати автоматично, а при необхідності оператор може втручатися в керування в будь-який момент польоту [1]. Початково такий безпілотник мав аналогове обладнання, та після модернізації у 2009-му році усе обладнання було замінено на цифрове. Застосування саме цифрового обладнання дозволяє активно використовувати діапазон надвисоких частот для отримання зображення набагато вищої якості та застосовувати шифровані канали зв'язку, що є дуже важливим фактором для військових БПЛА. Недоліком старих моделей такого безпілотнику є те, що він не має захисту від пеленгувальних систем і може бути пошкоджений за допомогою засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Такі засоби можуть здобувати інформацію про місцезнаходження радіоелектронних засобів противника та їх перехоплення або знищення.



Рис. 5. RQ-11 Raven

RQ-11 Raven важить всього 1,7 кг та має розмах крила у 1,5 м, а його довжина становить 96 см. При цьому, завдяки меншим розмірам та більш потужному двигуні може набирати швидкість до 95 км/год, проте має трохи меншу тривалість польоту – 45-60 хвилин. З 15-го вересня 2015-го року такий БПЛА поставляється з США в Україну за програмою військової допомоги Foreign Military Sales [2].

На Рис.6. зображений БПЛА українського виробництва під назвою Лелека-100 від компанії DeViro. Він використовується для вирішення завдань з аеророзвідки, патрулювання, сільського господарства, геодезії, промислового будівництва, будування автодорог, обслуговування лісових та водних господарств, огляд ліній електропередач та для підтримки під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.



Рис. 6. Лелека-100

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		

Відеотрансляція з БПЛА відбувається в кодованому вигляді, що виключає можливість його перехоплення стандартними відеоприймачами. Крім того, відеосигнал з борта БПАК не містить ні польотної телеметрії, ні GPS. Також існує можливість встановлення на нього окремої фотокамери, яка може бути запрограмована на здійснення фотографій із заданим інтервалом часу або по команді, яка буде надходити з системи автопілоту.

Для виключення вірогідності бути запеленгованим засобами РЕБ можливо-го противника, передавач відеоканалу оснащений системою дистанційного включення та відключення. БПЛА здатний здійснити зліт та приземлення в режимі радіомовчання, а протягом усього польоту оператор має можливість за потреби вмикати або вимикати відеотрансляцію з борту «Лелеки» [3].

Вага Лелеки-100 – 5 кг і при такій вазі він здатний розвивати швидкість до 60-70 км/год та знаходитися у повітрі протягом 2-2,5 годин. Радіус дії Лелеки-100 становить 30-50 км. Має системи автопілоту та може бути запрограмований за супутниковими мапами.

## 1.2. Огляд і аналіз відомих конструкцій рульових машинок

Розробка сучасних рульових машинок для малорозмірних безпілотних літальних апаратів потребує дотримання ряду вимог, таких як простота конструктивного виконання, низький рівень енергоспоживання, економічна ефективність, швидкодія, високі значення швидкості та кута відхилення рулів, широкий діапазон зміни тягового зусилля та можливість утримувати стабільну позицію органів керування в усьому діапазоні переміщень. Та найвиживішими вимогами до рульових машинок саме малорозмірних БПЛА є зменшення їх маси та габаритів.

Основні технічні рішення побудови рульових приводів БПЛА можна умовно поділити на рульові приводи, в яких використовують електромеханічний привод в парі з гвинтовим або кулачковими механізмами, а також приводи, що використовують електромагнітні перетворювачі, які працюють в режимі безперервних перемикань.

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		

станням гвинтової передачі.

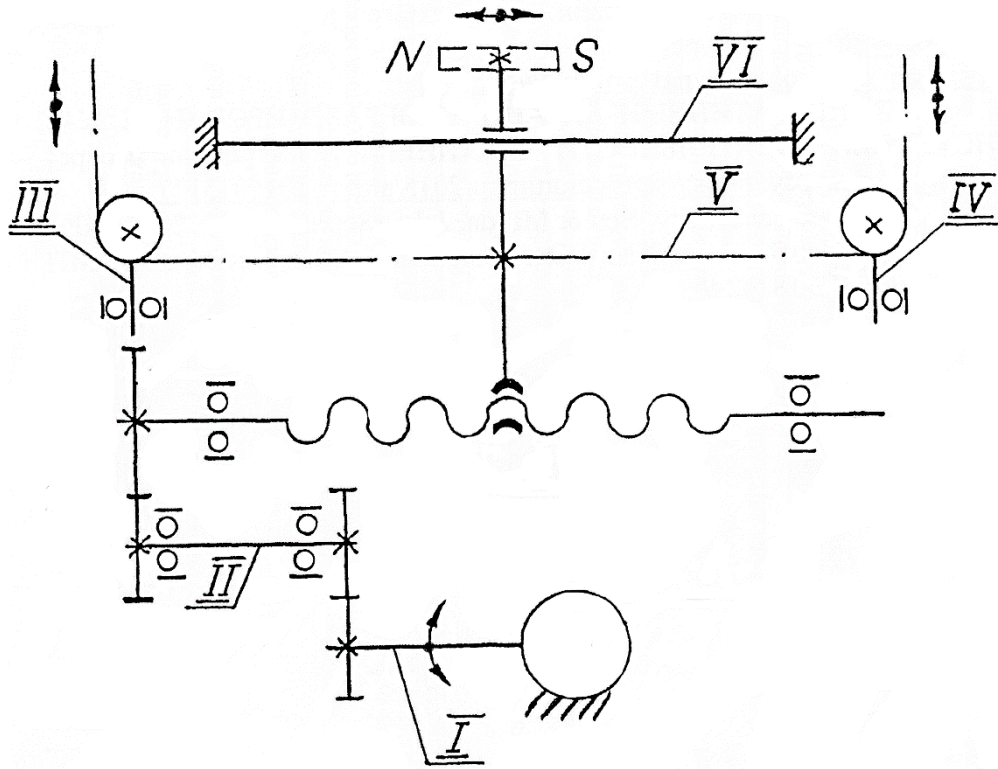


Рис. 7. Схема рулевого привода с гвинтовой передачей

При проектуванні рульового приладу за такою схемою найбільш важливим етапом в проектуванні редуктора є розподілення загального передаточного відношення по ступеням  $i_{23}$  та  $i_{45}$  (рис. 7.) Таке розподілення загального передаточного відношення проводиться з умов:

- мінімуму масогабаритних характеристик редуктора,
- потрібної точності передачі,
- забезпечення мінімальних величин моментів інерції зубчастих колес.

Рульові приводи з гвинтовою передачею у випадку габаритних обмежень можуть бути побудовані також з використанням планетарного механізму. Як показано в [4], використання планетарних редукторів, побудованих по схемі з двома корончастими і спареними сателітами, дає вигоду по габаритам і по масі приблизно вдвічі. Також існує варіант конструкції з використанням кульок, який має свої переваги і недоліки.

При використанні кулькогвинтового механізму суттєво зменшується сила тертя, але збільшується вага приводу. Конструкція виконуючого механізму з кулькогвинтовою передачею наведені на рис. 8, де 1 – гвинт кулькогвинтової передачі, 2 – сепаратор, 3 – ходова гайка кулькогвинтової передачі, 4 – зубчастий сектор вихідного валу, 5 – кульки.

При проектуванні кулькогвинтової передачі за базовий параметр приймається діаметр кульки, який визначається необхідною навантажувальною здатністю передачі, і через нього визначаються основні розміри передачі.

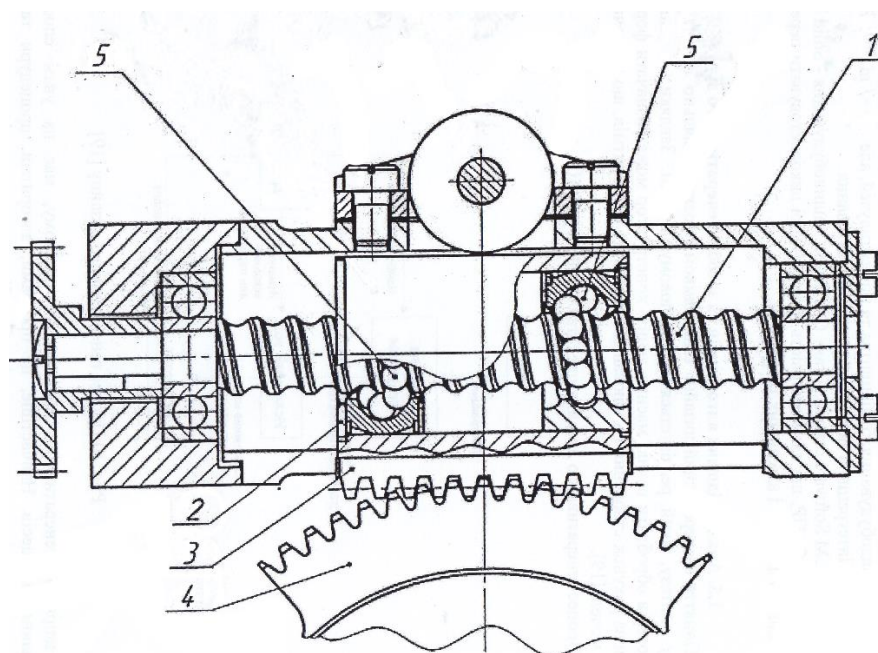


Рис. 8. Кульковогвинтовий механізм рульового приводу

Заслуговує на увагу також ідея побудови виконуючого механізму рульового приводу маломірного літального апарату на основі використання хвильової передачі з тілами кочення [4]. В таких механізмах для зменшення габаритів використовується кінематична схема з нерухомим сепаратором, що дозволяє використовувати жорстке колесо як зовнішню обойму радіального підшипника. При розрахунках хвильової передачі за базовий розмір також береться розмір тіл кочення, а інші розміри виражають через цей параметр. Зменшення габаритів досягається розміщенням всередині вихідного ступеня передачі, причому перша ступінь механізму розміщена послідовно з електричним двигуном.

Конструкція приводу з поляризованим електро механічним перетворювачем, що працює в режимі безперервних перемикачів з повним ходом якоря, представлена на рис.9 [5]. Особливістю конструкції є наявність однієї обмотки на рухомому якорі, що суттєво покращує його масогабаритні параметри, а також відсутність комутуючих контактів. Основні елементи приводу з імпульсним керуванням: 1 – постійні магніти; 2 – магнітопровід; 3 – якорь; 4 – рулі; 5 – пружина; 6 – обмотка; 7 – вал. Таким чином, якорь може рухатися навколо осі вала 7 разом з рулями і повертатися в початкове положення за допомогою пружини 5. Основні переваги імпульсного рульового приводу - надійність і компактність.

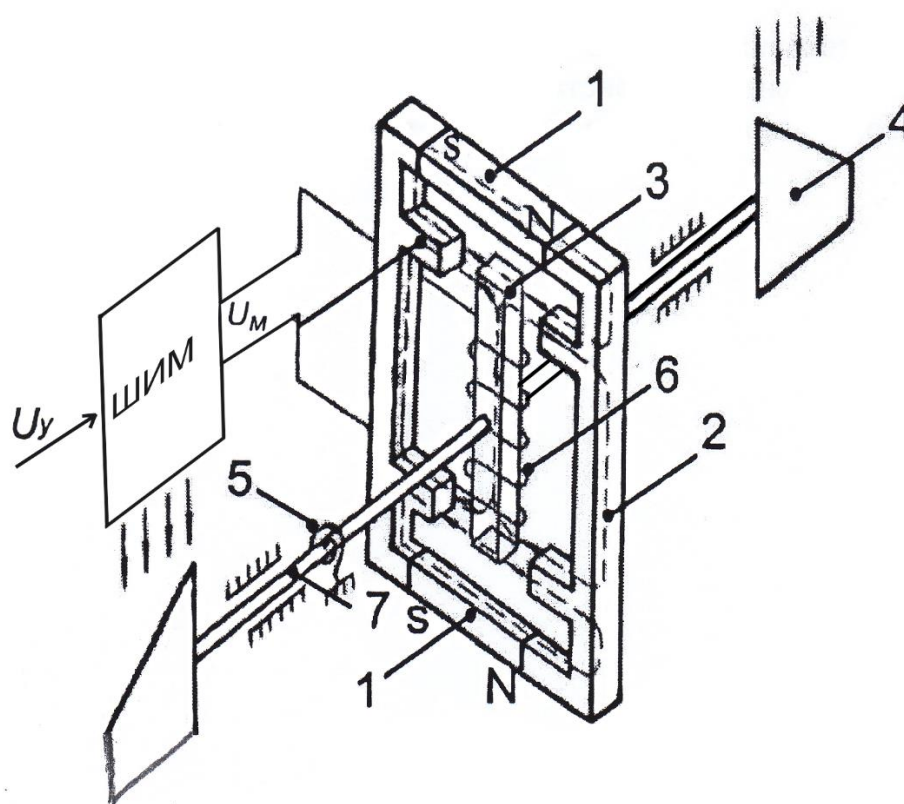


Рис. 9. Схема електро механічного приводу БПЛА

На рис. 10 представлена кінематична схема основного механізму бортового рульового приводу управління елеронами безпілотного літального апарату. Для зниження лобового опору запропоновано конструктивне виконання електро механічного приводу елерона з урахуванням інтеграції його в крило БПЛА [6]. Для передачі зусилля від електро механічного приводу до елерона розроблена кінематична схема на базі просторового кулачкового механізму барабанного



типу. Такий механізм складається з кулачка 1, що жорстко закріплений на осі 3. Вісь 3 з'єднана з віссю двигуна і передає обертальний момент на качалку 2. Для управління елероном крила в електромеханічній системі можуть використовуватись як двигуни постійного току, так і крокові двигуни [9]. Основні переваги крокового двигуна в порівнянні колекторним : висока надійність, швидкий старт і реверс та широкий діапазон швидкостей.

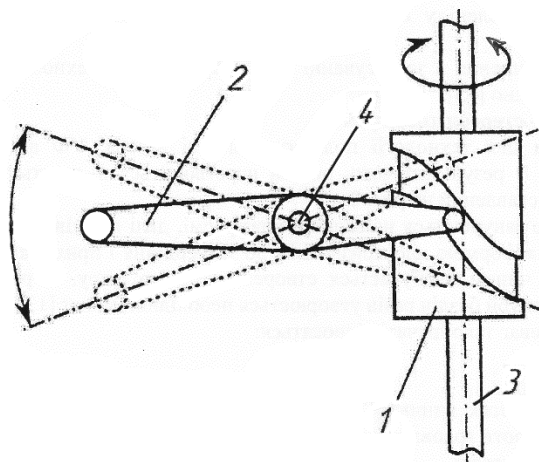


Рис. 10. Схема кулачкового рульового приводу БПЛА

На рис. 11. зображений загальний вигляд крокового двигуна з кулачковим приводом рульової машинки. Зубчастий ротор є внутрішнім кільцем гвинтової пари, яка керує елероном. Статор крокового двигуна формується з шести зпарених електромагнітних систем з постійними магнітами. Ці системи встановлюються в кондуктор після встановлення обмоток. Обмотки керування електромагнітними системами з'єднані послідовно і підключені до трьох мостових перетворювачів для того щоб створити в обмотках імпульси різної полярності. На ілюстрації: 1 – корпус кулачкової пари, 2- підшипники, 3 – магнітопровід електромагнітної системи, 4 – обмотка управління, 5 – компаунд, 6 – зубчастий ротор, 7 – стопорна пружинна шайба, 8 – основа.

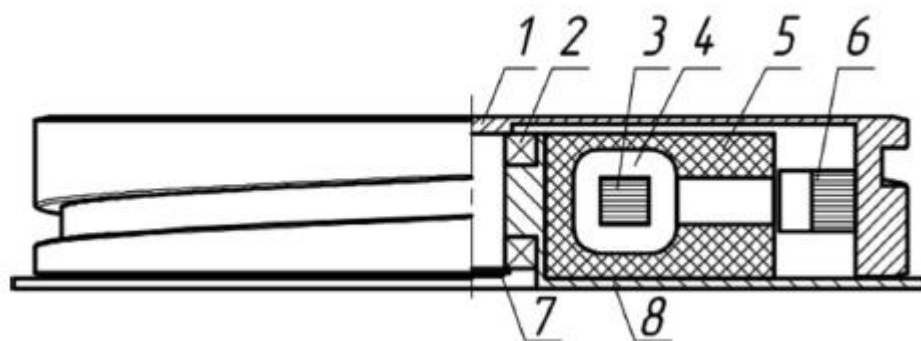


Рис. 11. Загальний вигляд крокового двигуна

Аналіз технічної і патентної літератури свідчить, що з метою зменшення масогабаритних характеристик, вартості виробництва та експлуатації рульового приводу при забезпеченні його високої швидкодії в широкому діапазоні навантажень в останній час для контурів стабілізації та керування БПЛА все частіше використовують приводи з п'єзоелектричним двигуном. Такі п'єзоприводи програють електромагнітним двигунам по потужності, а МЕМС мікромоторам - по ступені мікромініатюризації. В той же час, основна перевага п'єзомоторів – можливість прямого позиціювання з мікронною точністю, мала вага, безінерційність і практично необмежений термін роботи.

Так в університеті м. Конкук (Півд. Корея) для використання в конструкції малогабаритного безпілотного літального апарату розроблена система повороту площини руля висоти на основі використання п'єзоелектричного лінійного двигуна [8]. Для зменшення ваги основні елементи приводу були виготовлені з композитних матеріалів. При напрузі 200 В мали такі робочі характеристики:

- при відсутності аеродинамічного навантаження реальна величина відхилення рулів -  $\pm 7,1^\circ$ ;
- при швидкості руху БПЛА 5 м/с і незмінній напрузі живлення  $\pm 5,5^\circ$ .

Університетом штату Канзас (США) також були розроблені п'єзоелектричні пристрої привода аеродинамічних рулів малорозмірного літального апарата. В конструкції таких виконуючих пристроїв використовується



попередньою напружений (стиснутий) п'єзоелектричний елемент з подальшим навантаженням його зусиллям згину. Як указано в роботі [9], потужність такого приводу становила 24 Вт, а маса - не перевищувала 60 г.

### 1.3. Математична модель рульового приводу

Математична модель рульового приводу може бути представлена наступним диференціальними рівняннями:

$$\begin{aligned} u_{\partial\delta}(t) &= C_e \cdot \frac{d\delta_{\partial\delta}(t)}{dt} + R_{\partial\delta} \cdot i_{\partial\delta}(t) + L_{\partial\delta} \frac{di_{\partial\delta}(t)}{dt}, \\ J_{\text{сум}} \cdot \frac{d^2\delta_p(t)}{dt^2} &= M_{\text{сум.}\partial\delta}(t) - M_{\text{тр.ред}}(t) - M_{\text{ш}}(t), \\ M_{\text{сум.}\partial\delta}(t) &= q_{\text{ред}} \cdot (M_{\partial\delta}(t) - m_{\text{тр.}\partial\delta}(t)), \end{aligned} \quad (1.1)$$

де  $u_{\partial\delta}(t), i_{\partial\delta}(t)$  - напруга на обмотці якоря двигуна і струм в ній.

$\delta_{\partial\delta}(t)$  - кут повороту валу двигуна;

$C_e$  - коефіцієнт ЕРС двигуна;

$R_{\partial\delta}$  - опір обмоток ротора двигуна;

$L_{\partial\delta}$  - індуктивність якоря;

$M_{\partial\delta}(t)$  - момент на валу двигуна;

$M_{\text{ш}}(t)$  - шарнірний момент (зовнішній момент навантаження) на рулі;

$M_{\text{тр.}\partial\delta}(t), M_{\text{тр.ред}}(t)$  - моменти тертя в двигуні та редукторі;

$M_{\text{сум.}\partial\delta}(t)$  - момент двигуна, приведений до руля;

$J_{\text{сум}}$  - сумарний момент інерції, приведений до руля;

$q_{\text{ред}}$  - передатне число механізму.

Момент, що розвивається на валу двигуна, вираховується за формулою:

$$M_{\partial\delta}(t) = C_m \cdot i_{\partial\delta}(t), \quad (1.2)$$

де  $C_m$  - коефіцієнт моменту двигуна.

Розрахунок кута повороту руля:

$$\delta_p(t) = \frac{\delta_{\text{де}}(t)}{q_{\text{ред}}} . \quad (1.3)$$

Таким чином, щоб відхилити руль, привод повинен подолати момент аеродинамічних сил, що діють на руль відносно осі його обертання. Цей аеродинамічний момент називається шарнірним моментом. Він з'являється через те, що центр дії аеродинамічних сил, які діють на руль, не співпадає з віссю обертання руля.

Представлена математична модель рульового приводу є типовою для різних типів конструкції та дозволяє провести аналіз роботи рульового приводу та отримати попередній розрахунок його параметрів, проте не враховує ряд факторів і фізичних процесів (наприклад нелінійний характер моментів тертя в редукторі та двигуні), що також мають впливна параметри та характеристики об'єкта дослідження.

#### 1.4. Опис та аналіз кулькогвинтового механізму

Кулькогвинтовий механізм (рис.12.), що пропонується використати в конструкції рульового приводу, складається з гвинта та гайки і застосовується для перетворення обертального руху в поступальний. Особливість цієї передачі полягає у тому, що у гвинтовій різьбі криволінійного профіля розміщуються кульки, що перетворюють момент сили сухого тертя в момент сили тертя кочення.



Рис.12. Загальний вигляд кулькогвинтового механізму

При обертанні гвинта кульки починають рухатися по гвинтовим каналам, поступально переміщують гайку і в подальшому потрапляють в перепускний канал, по якому повертаються в початкове положення. Таким чином, переміщення кульок відбувається циклічно по замкнутому контурі всередині гайки. На рис.13. зображений розріз гайки, на якому демонструється загальний вигляд та принцип роботи перепускного каналу.

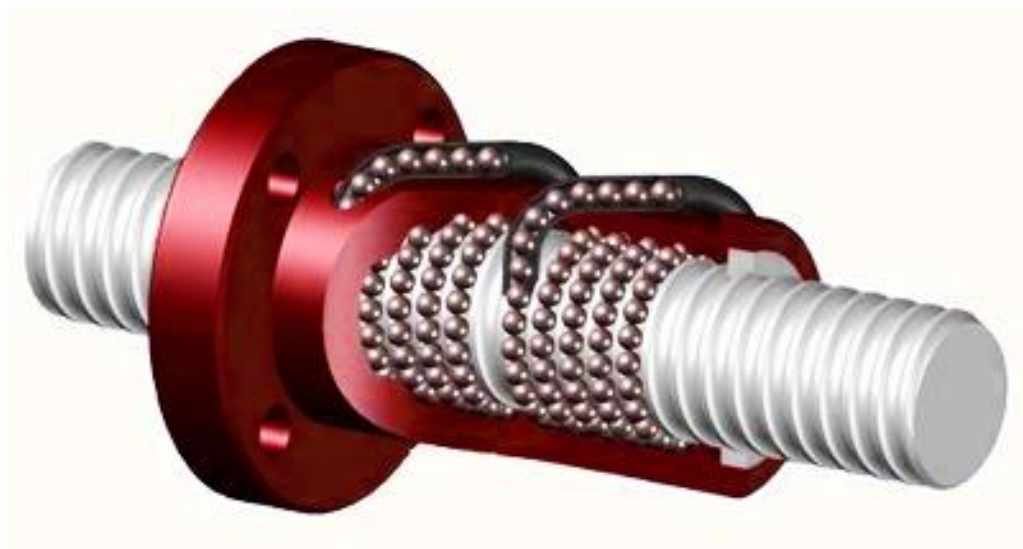


Рис.13. Гайка кулькогвинтової передачі у розрізі.

Основними геометричними параметрами кулькогвинтової передачі є номінальний діаметр  $d$ , крок різьби і діаметр  $D$  тіл кочення.

Перевагами такої передачі є можливість створення великих осьових сил, високий ККД передачі, можливість отримати високу точність поступального руху та малі габарити при високій передавальній здатності.

До недоліків кулькогвинтової передачі можна віднести комплексність конструкції гайки. Виготовлення перепускних каналів гайки доволі складний технологічний процес, тому це ускладнює виробництво всього приводу, а висока точність виготовлення важлива для правильного переміщення кульок по каналам. Також варто приділяти увагу тому, що такий механізм має мати технологічний захист від забруднення, адже мінімальне забруднення каналів призводить до значних проблем з роботою.

Для зменшення впливу вищезазначених недоліків може використовуватися кулькогвинтова передача з попереднім натягом. Для створення натягу використовують дві гайки з осьовим зміщенням, яке здійснене за допомогою прокладок між двома половинками корпусу або їх кутовим поворотом.

Деталь	Матеріал	Твердість за Роквеллом	Шорсткість (максимальна)
Гвинт	Сталь 8ХФ, Сталь ХВГ, Сталь 8ХФВД	61 HRC	0,63 мкм
Гайка	Сталь 9ХС, 18ХГТ, Сталь ШХ15, 12ХН3А	61 HRC	0,63 мкм
Вкладиші	Сталь 9ХС, Сталь 40Х	40-50 HRC	2,5 мкм
Кульки	Сталь ШХ 15, ШХ20СГ	60-65 HRC	0,040 мкм

### 1.5. Переваги імпульсного керування електромеханічними приводами постійного струму перед аналоговими

У більшості сучасних конструкцій електромеханічних рульових приладів для малорозмірних БПЛА використовують двигуни постійного струму, побудовані на основі широтно-імпульсних перетворювачів, які реалізують процес широтно-імпульсної модуляції. Розглянемо на прикладі двигуна ШІМ-Д.

Двигуни ШІМ-Д працюють з частотою 1-10 кГц і мають ряд переваг перед рульовими приладами, які працюють за схемою універсального випрямовувача-двигуна (УВ-Д). Серед переваг можна виділити:

- параметри швидкодії реакції на керуючі та збурюючі впливи;
- значно менші показники енергетичних витрат у двигуні;
- вищий коефіцієнт потужності в усьому діапазоні кутових швидкостей;
- кращі масогабаритні показники електронного блоку керування;
- менша вартість електродвигуна через менші витрати матеріалів;

Підсумовуючи все вищеперечислене можна прийти до висновку, що з розвитком технологій виробництва використання мікроелектронних рульових приладів буде набувати все більшої популярності та розповсюдженості через значну економію ресурсів та, найважливіше – зменшення маси і розмірів блоку керування. Аналіз технічної і патентної літератури свідчить, що з метою зменшення масогабаритних характеристик, вартості виробництва та експлуатації рульового приводу при забезпеченні його високої швидкодії в широкому діапазоні навантажень в останній час для контурів стабілізації та керування БПЛА все частіше використовують приводи з п'єзоелектричним двигуном. Такі п'єзоприводи програють електромагнітним двигунам по потужності, а МЕМС мікромоторам - по ступені мікромініатюризації. В той же час, основна перевага п'єзомоторів – можливість прямого позиціонування з мікронною точністю, мала вага, безінерційність і практично необмежений термін роботи.

Таким чином, одним з актуальних завдань проектування сучасних високо-маневрових малорозмірних безпілотних літальних апаратів для управління елеронами на всіх режимах їх функціювання, є проектування такого бортового рульового приводу, в якому забезпечується такі основні конструктивно – технологічні та експлуатаційні характеристики:

- простота конструктивного виконання;
- надійна довготривала робота в умовах зовнішніх збурень.

А також наступні техніко – економічні показники:

- високі масо габаритні характеристики;
- високі значення швидкості та кута відхилення рулів;
- відсутність люфтів;
- енергоефективність.

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		27

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА РУЛЬОВОГО ПРИВОДУ З КУЛЬКОГВИНТОВОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ

### 2.1 Розробка кінематичної схеми рульової машинки

Завдання кінематичної схеми – показати основні принципи будови конструкції мехнізму та кінематичні характеристики всіх елементів конструкції. Головною вимогою до кінематичної схеми є надання чіткого уявлення про взаємне розташування за взаємоз'язки між елементами механізму. У рульовому приводі, який розглядається у цій роботі, можна скористатися уже згаданою в теоретичній частині кінематичною схемою рульового приводу з гвинтовою передачею, що зображена на рис. 14. На даній схемі вали позначені римськими цифрами.

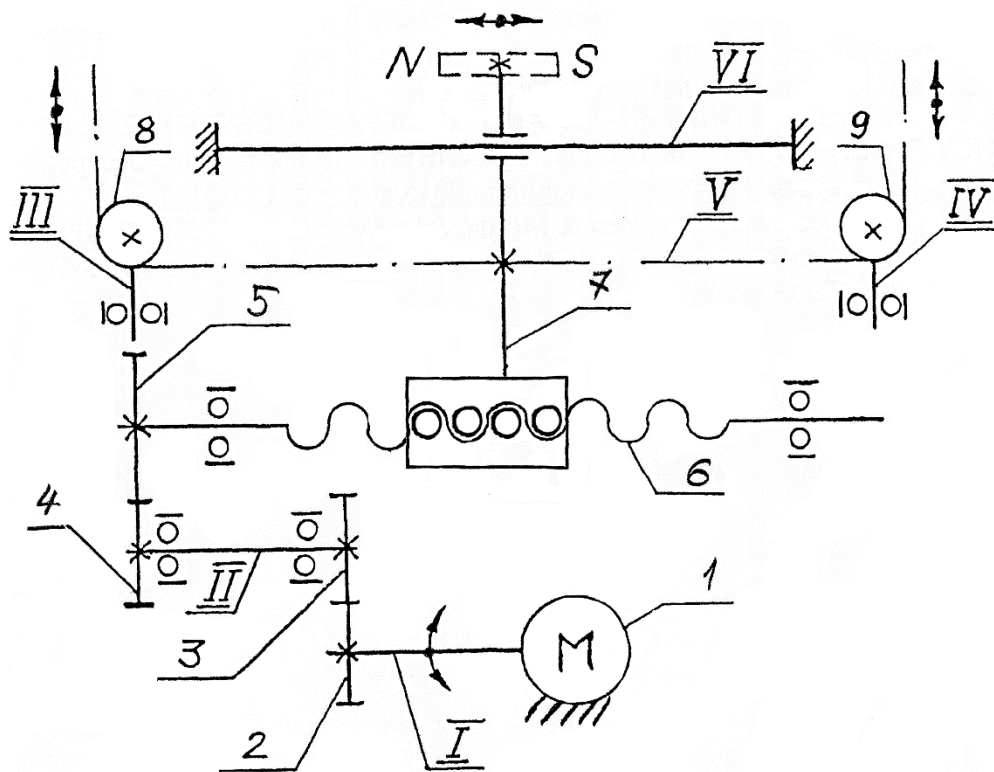


Рис.14. Кінематична схема рульової машинки

Основною складністю розробки кінематичної схеми рульової машинки є розрахунок передавального відношення редуктора по ступеням, так як це передбачає визначитися з критерієм проектування редуктора : мінімуму маси, мінімуму габаритів. Передатне відношення редуктора визначається за потребою в

залежності від швидкості обертання двигуна та необхідної швидкості гвинта, що рухає гайку в рульовій машинці. При розрахуванні передатного відношення треба враховувати певні фактори:

- характер перетворення руху в редукторі;
- характеристики кінцевих елементів редуктора;
- потреба зменшити моменти інерції редуктора.

Використаємо у даній рульовій машинці малорозмірний двигун ДПМ-20-НІ-08. Згідно з його характеристиками, його число обертів дорівнює 4500 обертів за хвилину при напрузі в 27 В. Відштовхуючись від таких даних можемо зрозуміти, що при напрузі в 24 В число обертів двигуна буде дорівнювати 4200 об/хв, тобто 70 об/с. При розробці кінематичної схеми кулькогвинтової передачі потрібно опиратися на вищезазначені показники для розрахунку передатного відношення редуктора та всіх інших елементів конструкції рульової машинки з кулькогвинтовою передачею. Довжина гвинта – 60мм. При використанні гвинта з різьбою М8х5 можемо порахувати число обертів ходового гвинта.

Число обертів, необхідне для переміщення гайки з середнього положення в кінцеве вирахуємо як частку з ділення половини довжини гвинта на крок різьби, тобто відстань, яку вона проходить за один оберт.

$$n = \frac{\frac{1}{2} l_{вал}}{l_1} = \frac{30 \text{ мм}}{5 \text{ мм / об}} = 6 \text{ об},$$

Через те що гайка може перейти в кінцеве положення за час 1 с, приймаємо число обертів за одиницю часу як 6 об/с. Після цього маємо змогу визначити передатне відношення двигуна до ходового гвинта як частку від ділення числа обертів двигуна і гвинта за одиницю часу. Маємо:



$$i_{\partial\partial} = \frac{n_{\partial\partial}}{n_{\partial\partial}} = \frac{70 \text{ об / хв}}{6 \text{ об / хв}} = 11,6 ,$$

Обираємо число зубців шестерні, що знаходиться на валу двигуна  $Z=10$  і , тоді число зубців шестерні, що знаходиться на ходовому гвинті буде дорівнювати результату множення числа зубців шестерні на валу двигуна та передатного відношення, тобто 116.

Оберемо модуль зубців шестерней  $m = 0,3$  мм, тоді міжцентрові відстані між двигуном та ходовим гвинтом дорівнюватимуть

$$L = \frac{m}{2} (Z_1 + Z_2) = \frac{0,3}{2} \cdot (10 + 116) = 18,9 \text{ мм} .$$

Кінематика роботи рульової машинки з кулькогвинтовим приводом та гнучким зв'язком з органами керування полягає у наступному: на валу двигуна  $M$  жорстко закріплена шестерня, яка з'єднана з іншими шестернями, що передають обертальний рух вала електродвигуна на шестерню, яка жорстко закріплена на ходовому гвинті, який обертається в шарикопідшипниках. На цьому гвинті закріплена гайка, яка рухається по направляючій. На іншому кінці гайки закріплений постійний магніт, що керує герконами кінцевого положення цієї гайки. З рухомою гайкою з'єднуються троси гнучкого зв'язку з органами керування. Троси вкладені в канавки роликів на барабанах, які обертаються в шарикопідшипниках.

## 2.2 Розрахунки елементів кулькогвинтої передачі

Розрахуємо параметри кулькогвинтової передачі. Як уже було зазначено в теоретичній частині, основними геометричними параметрами кулькогвинтової передачі є номінальний діаметр різьби ( $d_0$ ), крок різьби ( $p$ ), діаметр кульки ( $d_w$ ), кут контакту ( $\alpha$ ) та число заходів різьби (зазвичай  $4=1$ ).

Для початку розрахуємо зовнішній та внутрішній діаметри різьби гвинта. Це можна зробити за наступними формулами:

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		

$$\begin{aligned}d_{вн} &= d_0 - 1,012d_w, \\d_{зв} &= d_0 - 0,35d_w.\end{aligned}\tag{2.1}$$

Підставимо значення номінального діаметру (8 мм) та діаметру кульки (2,5 мм) і порахуємо:

$$\begin{aligned}d_{вн} &= 8 - 1,012 \cdot 2,5 = 5,47 \text{ мм}, \\d_{зв} &= 8 - 0,35 \cdot 2,5 = 7,125 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Таким чином отримуємо значення внутрішнього діаметру гвинта – 5,47 мм та зовнішнього діаметру – 7,125 мм.

У даній конструкції будемо використовувати кулькогвинтову передачу з попереднім натягом, тому маємо таку формулу для сили попереднього натягу:

$$F_H = (0,1 \dots 0,2)C_a\tag{2.2}$$

Де  $C_a$  - динамічна вантажопідйомність на вісь кулькогвинтової передачі.

Після розрахунків отримуємо значення сили попереднього натягу в 2000 Н. Для ходового гвинта вибрана метрична різьба М8х5. Виходячи з цих параметрів базова статична вантажопідйомність дорівнюватиме 4700 Н, а базова динамічна вантажопідйомність – 2000 Н. Діапазон моменту холостого ходу в такому випадку – 0,05 Н·м – 0,20 Н·м.

Під час прикладення до гвинта зовнішньої осьової сили  $F_a$  відбувається перерозподіл сил, що діють на гайки. Так, наприклад, якщо на передачу з боку лівої гайки буде діяти зовнішня осьова сила, то осьові сили, які діють в зонах контакту з гвинтом лівої та правої гайки відповідно, знаходяться за формулами:

$$\begin{aligned}F_L &= F_H (1 + 0,25F_a / F_H)^2; \\F_H &= F_L - F_a.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Для розрахунку кулькогвинтової передачі на міцність треба опиратися на такі критерії як опір контактній втомі робочих поверхностей і відсутність пластичних деформацій. Зазвичай кулькогвинтові передачі не конструюють а підбирають за каталогом. Розрахунок необхідно вести за динамічною осьовою вантажопідйомністю задля упередження втомного руйнування та за статичною осьовою навантажопідйомністю задля упередження пластичних деформацій.

Значення базових динамічної та статичної вантажопідйомностей (позначаються  $C_a$  і  $C_0$  відповідно) кулькогвинтової передачі з трьохвитковими гайками повинні бути підібрані згідно з обраним діаметром кульки (2,5 мм). Базова статична осьова вантажопідйомність – це осьова сила в Н, що викликає загальну надлишкову пластичну деформацію кульки, канавок гвинта та гайки, що дорівнює одній десятитисячній долі діаметру кульки. Базова динамічна осьова вантажопідйомність – це осьова сила в Н, яку кулькогвинтова передача може сприймати при базовій довговічності. Базові осьові вантажопідйомності відповідають 95 відсотковій надійності та розповсюджуються на передачі, які виготовлені для звичайних умов експлуатації. Якщо властивості матеріала відрізняються від стандартних, або при підвищених вимогах до надійності передачі, використовується зкоректована динамічна осьова вантажопідйомність  $C_{кор}$ , що визначається за формулою:

$$C_{кор} = K_M K_p K_a C_a; \quad (2.4)$$

де  $K_M$  - коефіцієнт якості матеріалу;

$K_p$  - коефіцієнт надійності передачі;

$K_a$  - коефіцієнт точності передачі;

$C_a$  - базова динамічна вантажопідйомність кулькогвинтової передачі.

При звичайній плавці коефіцієнт якості матеріалу дорівнює одиниці. Коефіцієнт надійності передачі при 95%-й надійності дорівнюватиме 0,85.

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		

Коефіцієнт точності передачі дорівнює 0,9, враховуючи фактори, які розібрані в розрахунках точності для рульової машинки.

Порахуємо зкореговану динамічну осьову вантажопідйомність за формулою:

$$C_{кор} = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 2000 = 1530 \text{ Н};$$

Виходить, що зкорегована динамічна осьова вантажопідйомність дорівнюватиме 1530 Н. Динамічна міцність передачі буде забезпечуватися за умови, що осьова сила не буде перевищувати зкореговану осьову вантажопідйомність.

Також важливим показником рульового приводу є ресурс, тобто довговічність кулькогвинтової передачі. Він позначається як  $L$  (мільйони обертів), або як  $L_{год}$  як години роботи до появи деформацій конструкції. Він розраховується за формулами:

$$L = (c_{кор} / F_k)^3; \quad (2.5)$$

$$L_{год} = 10^5 L / (60n). \quad (2.6)$$

Де  $C_{кор}$  - зкоректована динамічна вантажопідйомність,  $F_k$  - парна осьова сила,  $n$  – частота обертання гвинта. З цього виходить, що умовою придатності кулькогвинтової передачі є те, що розрахунковий ресурс повинен бути більшим або дорівнювати заданому ресурсу.

Статична контактна міцність може бути забезпечена за умови, що розрахункова осьова сила менша або дорівнює коефіцієнту точності передачі помноженому на базову статичну осьову вантажопідйомність.

В усьому іншому розрахунок кулькогвинтової передачі дуже схожий на розрахунок звичайної гвинтової передачі. Конструктивною особливістю цієї схеми є те, що осьова сила  $Q$  не співпадає з віссю обертання гвинта.

$$Q = \frac{2M_1}{d_{cp} \left(1 + \frac{2a}{l_n} f_n\right) \left[ \operatorname{tg} \lambda + \frac{f}{(\cos \alpha \cos \lambda - f \sin \lambda) \cos \lambda} \right]} ; \quad (2.7)$$

Де  $d_{cp}$  - середній діаметр різьби гвинта;

$a$  – плече прикладання сили  $Q$ ;

$l_n$  - довжина контакту гайки повзуна з направляючою;

$f_n$  - коефіцієнт тертя повзуна з направляючою;

$\lambda$  - кут нахилу витка різьби;

$f$  - коефіцієнт тертя матеріалу гвинта і гайки;

$\alpha$  - кут різьби.

Ходовий гвинт передачі та гайка виготовлені зі сталі, тому приймаємо коефіцієнт тертя за 0,16.

Кут нахилу витка різьби знайдемо за формулою:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{p}{\pi \cdot d_{cp}} = \frac{5}{3,14 \cdot 7,125} = 0,2235;$$

Стає зрозуміло, що кут нахилу витка різьби -  $12^\circ 30'$ . Після цього необхідно визначити момент, що передається на ходовий гвинт. Маємо формулу:

$$M_{11} = M_{12} - M_{on}; \quad (2.7)$$

Де  $M_{12}$  - статичний момент, що передає електродвигун  $M$  на вал II.

$M_{on11}$  - статичний момент тертя опор валика 1.

Статичний момент з електродвигуна можна вирахувати за формулою:

$$M_{12} = M_{\partial\partial} \cdot i_{21} \cdot \eta_{21}; \quad (2.8)$$

Де  $M_{\partial\partial}$  - обертальний момент, що розвивається електродвигуном.

$i_{23}$  - передатне відношення зубчастої передачі.

$\eta_{21}$  - ККД пари зубчастих коліс.

Розрахунок ККД буде представлений у розділі 2.3 цієї пояснювальної записки.

У якості опор використані підшипники 100093 з посадковим діаметром 3 мм. Момент опору таких підшипників дорівнюватиме 0,03 Н см.

Тоді момент на валу II дорівнює:

$$M_{11} = M_{12} - M_{on} = 0,3768 - 0,03 = 0,3468 \text{ Н} \cdot \text{см}$$

Формула для розрахунку статичного моменту, що передається на ходовий гвинт представлена нижче:

$$M_1 = M_{43} - M_{on}; \quad (2.9)$$

Де  $M_{43}$  - статичний момент, що передається від вала II на ходовий гвинт через зубчасті колеса 3 і 4. Момент опору не змінюється через те, що в обох випадках використовуються однакові підшипники.

Статичний момент  $M_{43}$  дорівнює:

$$M_{43} = M_{11} \cdot i_{43} \cdot \eta_{21} = 0,3468 \cdot 3,5 \cdot 0,96 = 1,1625 \text{ Н} \cdot \text{см}$$

Тоді статичний момент, що передається на ходовий гвинт дорівнює:

$$M_1 = M_{43} - M_{on} = 1,1652 - 0,03 = 1,1352 \text{ Н} \cdot \text{см}$$

Після цього підставляємо усі значення у формулу (2.7):

$$Q = \frac{2M_1}{d_{cp} \left(1 + \frac{2a}{1_n} f_n\right) \left[ \operatorname{tg} \lambda + \frac{f}{(\cos \alpha \cos \lambda - f \sin \lambda) \cos \lambda} \right]} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2 \cdot 1,14}{0,712(1 + \frac{18}{8} \cdot 0,08) \left[ 0,2235 + \frac{0,16}{(0,8572 \cdot 0,9763 - 0,16 \cdot 0,2164) \cdot 0,9763} \right]} = \\
&= \frac{2 \cdot 1,14}{0,712 \cdot 1,36 \left[ 0,2235 + \frac{0,16}{0,7865} \right]} = \frac{2 \cdot 1,14}{0,969} [0,4260] = \\
&= \frac{2,8}{0,413} = 6,8 \text{ Н}.
\end{aligned}$$

Таким чином отримуємо тягове зусилля, що виникає на гайці в точці закріплення тросів керування,  $Q = 6,8 \text{ Н}$ .

### 2.3 Розрахунок коефіцієнта корисної дії рульової машинки

Розрахунок коефіцієнта корисної дії (ККД) рульової машинки потрібен для визначення величини статичних моментів, що діють на проміжних валах і тягових зусиль на тросах гнучкого зв'язку з органами керування.

Для початку потрібно визначити ККД редуктора. Редуктор у даному випадку представлений зубчастою передачею з прямозубими колесами. Щоб визначити загальний ККД редуктора нам потрібно визначити ККД всіх ланок зубчастих передач.

ККД зубчастої передачі з прямозубими колесами можна порахувати за такою формулою:

$$\eta = 1 - c - \mu \cdot \pi \left[ \frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} \right]; \quad (2.10)$$

де  $\eta$  - ККД;

$\mu$  - коефіцієнт тертя;

$Z_1, Z_2$  - число зубців у зубчастих колесах.

У даній рульовій машинці використані зубчасті колеса, виготовлені з нержавіючої сталі 25Х13Н2 з твердістю 28-34 НРС і піддані електромеханічному поліруванню, тому коефіцієнт третя буде дорівнювати 0,06.

Замість використання цієї формули можна використати спеціальні таблиці для коефіцієнту тертя зубчастих передач, складених з двох однакових зубчастих коліс. За допомогою цих таблиць можна також визначити ККД передач з різними колесами, тобто тих, у яких передатне відношення не дорівнює одиниці. Обчислення ККД у такому випадку поляє у знаходженні середнього арифметичного між ККД двох зубчастих коліс. Це можна сформулювати наступною формулою:

$$\eta = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}; \quad (2.11)$$

Згідно з табличними даними отримуємо значення  $\eta = 0,96$ .

Дуже важливим для даної роботи є порівняння ККД кулькогвинтової передачі з ККД передачі, яка на разі дуже поширена у сучасних рульових машинках безпілотних літальних апаратів. Саме для цього розрахуємо ККД для звичайної гвинтової передачі, щоб отримати конкретні дані, які потрібні для порівняння доцільності використання тієї чи іншої передачі у рульовому приводі та впевнитися у перевагах вибраного нами типу передачі.

Для розрахунків будемо використовувати гвинтову передачу з гвинтом з метричною різьбою М6х1, з такими параметрами: середній діаметр такого гвинта дорівнює 5,35 мм, кут нахилу різьби – 30 градусів, крок різьби – 1 мм. За формулами, представленими раніше можемо вирахувати кут нахилу витка різьби такого гвинта:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{p}{\pi \cdot d_{cp}} = \frac{1}{3,14 \cdot 5,35} = 0,0595.$$



Кут нахилу витка різьби у такому випадку дорівнює  $3^{\circ}30'$ . Цих даних нам вистачить для розрахунку ККД передачі гвинт-гайка з використанням наступної формули:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{f}{\sin \alpha} \cdot \left[ \frac{1 + f \cdot \frac{a}{1} \cdot \frac{\sin \lambda}{\sin \alpha}}{\cos \alpha \cdot \cos \lambda - f \cdot \sin \lambda} - \frac{2a}{1 \cdot \sin \alpha} \right]}; \quad (2.12)$$

Де  $a$  – плече прикладання тягового зусилля на органи керування, що дорівнює 9 мм;

$f$  – коефіцієнт тертя між гайкою та гвинтом. У даному випадку припустимо, що і гайка і гвинт виконані зі сталі та мають коефіцієнт 0,16.

$l$  – довжина контакту гайки з гвинтом, яка дорівнює 7 мм.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1}{1 + \frac{f}{\sin \alpha} \cdot \left[ \frac{1 + f \cdot \frac{a}{1} \cdot \frac{\sin \lambda}{\sin \alpha}}{\cos \alpha \cdot \cos \lambda - f \cdot \sin \lambda} - \frac{2a}{1 \cdot \sin \alpha} \right]} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{0,16}{0,5} \cdot \left[ \frac{1 + 0,16 \cdot \frac{9}{7} \cdot \frac{0,0616}{0,5}}{0,8572 \cdot 0,9981 - 0,16 \cdot 0,0616} - \frac{2 \cdot 9}{7 \cdot 0,5} \right]} = \\ &= \frac{1}{1,9408} = 0,51. \end{aligned}$$

Таким чином розуміємо, що середній ККД передачі гвинт-гайка буде дорівнювати приблизно 51%. Такий коефіцієнт корисної дії не можна вважати

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		

високим, саме тому гвинтова передача потребує покращення. Розрахуємо ККД кулькогвинтової передачі для порівняння.

У кулькогвинтовій передачі втрати виникають в опорах та різьбі. Опорами гвинта є підшипники кочення, тому  $\eta_{on}=0,98$ . Проте більшу частину втрат викликає різьба, тому при ведучому гвинті (обертальних рух гвинта перетворюється на поступальний рух гайки) ККД може бути вирахований за наступними формулами:

$$\eta = \frac{K_{\eta} \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg}(\psi + \rho)}; \quad (2.13)$$

$$\psi = \operatorname{arctg}[pi_3 / (\pi d_0)]; \quad (2.14)$$

$$\rho = \operatorname{arctg}[f_k / (0,5d_w \sin 45^{\circ})]. \quad (2.15)$$

Де,  $\psi$  - кут підйому різьби,

$\rho$  – приведений кут тертя,

$p$  - крок різьби,

$i_3$  - число заходів різьби,

$d_0$  - номінальний діаметр різьби,

$d_w$  - діаметр кульки.

Також у даних формулах задіяні два коефіцієнти:  $f_k$  - коефіцієнт тертя кочення (зазвичай 0,01 мм), та  $K_{\eta}$  - коефіцієнт, що залежить від відносної величини сили попереднього натягу.

$$\psi = \operatorname{arctg}[pi_3 / (\pi d_0)] = \operatorname{arctg}\left[5 \cdot \frac{6}{3,14 \cdot 8}\right] = \operatorname{arctg}1^{\circ}20' = 50^{\circ}19';$$

$$\rho = \arctg[f_k / (0,5d_w \sin 45^\circ)] = \arctg \left[ \frac{0,01}{0,5 \cdot 2,5 \cdot 0,707} \right] = 1^\circ 6'.$$

$$\eta = \frac{K_\eta \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg}(\psi + \rho)} = \frac{1 \cdot 0,2045}{0,2349} = 0,87;$$

ККД кулькогвинтової передачі в середньому дорівнює приблизно 87%, тобто більше ніж на 20% більше за значення ККД для передачі без використання кульок. Стає зрозуміло, що використання кулькогвинтової передачі значну перевагу перед використанням звичної передачі гвинт-гайка через те, що кулькогвинтова передача потребує значно меншого зусилля, щоб працювати на такому ж рівні як передача гвинт-гайка. Стає також зрозуміло, що для досягнення високого ККД кулькогвинтової передачі потрібні невеликі моменти опору в різьбі.

#### 2.4 Кінематична точність рульової машинки і порядок її визначення

Точність рульової машинки характеризується кінематичною точністю її редуктора, на яку впливають наступні фактори:

- вибраний тип передачі;
- передатне відношенням;
- кількість кінематичних пар;
- модуль зубчастих передач;

Також до кінематичної точності відноситься поняття холостого ходу. Холостий хід – це переміщення однієї з ланок кінематичного ланцюга, що здійснюється за період спокою іншого. На появу холостого ходу впливають ряд факторів, таких як:

- зазори в з'єднаннях зубчастих коліс;
- скручення валів від обертового моменту;

- пружні деформації в з'єднаннях зубчастих коліс та валів;
- наявність люфтів конструкції;
- різниці температурних деформацій зубчастих коліс та корпусу механізму

Через специфіку конструкції рульової машинки для малорозмірного безпілотного літального апарату, такими складовими появи холостого ходу можна знехтувати через малі розміри усієї конструкції та незначну дію вищезазначених факторів, тому розрахунок точності проводити не потрібно, тому можемо брати табличні значення діапазон моменту холостого ходу – 0,05 Н·м – 0,20 Н·м.

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		41

## Висновки

Тема дипломного проекту «Рульовий привод безпілотного літального апарату» на разі є доволі актуальною та буде залишатися такою і надалі, адже з покращенням технологій та можливостей виробництва галузь безпілотної авіації буде активно рухатися в напрямку створення набагато компактніших БПЛА через простоту їх використання. Зменшення маси і розмірів БПЛА призведе до розширення спектру областей їх можливого застосування. Саме через це будь які покращення рульового приводу безпілотних літальних апаратів є корисним, адже зменшує витрати на виробництво та експлуатацію БПЛА та у більшості випадків дозволяє використовувати більш легкі та компактні двигуни за рахунок переваг певного типу передачі, що застосовуються у рульовому приводі.

У проекті розроблено креслення рульового приводу безпілотного літального апарату з використанням кулькогвинтової передачі. Описані та порівнені існуючі види безпілотної авіаційної техніки та типи реалізації їх рульових приводів. Проаналізовані переваги та недоліки кулькогвинтової передачі перед іншими відомими конструкціями. Проведений розрахунок для інтегрування такого типу передачі у рульові приводи сучасних БПЛА. Приведені розрахунки кулькогвинтової передачі для кульок діаметром 2,5 мм. Розрахований та порівнений ККД передачі гвинт-гайка та кулькогвинтової передачі.

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		

## Список літератури

- [1] US unmanned aerial systems / Jeremiah Gertler (3 січня 2012) с.45
- [2] Ukrainian Armed Forces to get USD 9.05M worth of RQ-11B RAVEN UAVs // "Ukrainian Defense Review", № 4, October - December 2015. page 6
- [3] Безпілотний авіаційний комплекс DeViRo 'Лелека-100'. Архів <http://uav-ua.com/ukr/leleka-100> за 2018-07-22.
- [4] Крылов Н.В. Анализ массогабаритных показателей электромеханических рулевых приводов с различными типами механических передач / Н.В.Крылов, С.Л. Самсонович, В.С.Степанов//Известия Тул ГУ. Технические науки.-2012.-Вып.1.-С. 26-31.
- [5] Варенов А.А. Структура и динамическая модель электропривода с импульсным управлением для беспилотного летательного аппарата мониторинга энергообъектов / А.А.Варенов // Проблемы энергетики.- 2013.- № 5-6.- С.78 – 83.
- [6] БатищевД.В. Электромеханический привод для управления элеронами летательного аппарата /Д.В.Батищев, А.А. Гуммель, К.Р. Гильмияров// Известия вузов. Северо – кавказский регион. Технические науки.-2014.- №1.- С.74 - 78.
- [7] Design of elevator control surface actuated by LIPCA for small unmanned air vehicle: Докл. [Conference on Smart Structures and Materials 2006 "Smart Structures and Integrated Systems", San Diego, Calif., 27 Febr.-2 March, 2006] / Yoon K. J., Setiawan Hery, Goo N.S. // Proc. SPIE. - 2006. - № 6173. - С. 61730D/1-61730D/8.
- [8] Post-buckled precompressed (PBP) piezoelectric ac- 10 tuators for UAV flight control: Докл. [Conference on Smart Structures and Materials 2006 "Smart Structures and Integrated Systems", San Diego, Calif., 27 Febr.-2 March, 2006] / Vos Roelof, Barrett Ron, Krakters Lars, van Tooren Michel // Proc. SPIE. - 2006. - № 6173. - С. 61730E/1-61730E/12.

[9] Рулевой привод летательных аппаратов / Соколовский Г. А., Бажан А. Н., Тимохин А. И. (ФГУП ГосМКБ "Вымпел" им. И. И. Торопова) // Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: Сборник докладов 6-й Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 21-23 мая, 2002. - М.: Изд-во МАИ, 2002. - С. 257-261.

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-		44

					ПГ 6113.1730.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Да-			45